不同沼泽湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征及其影响因素[①]

赵海燕， 张 剑， 刘 冬， 齐璇璇， 谢欢杰
（西北师范大学地理与环境科学学院，甘肃 兰州 730070）

摘 要： 干旱区湿地在改善地区生态环境，维护地区生态稳定等方面发挥着重要作用，研究干旱区湿地土壤碳（C）、氮（N）、磷（P）等元素的生态化学计量学特征，有助于深入了解干旱区湿地土壤养分的供给能力及循环与平衡机制。本文以河西走廊西段，疏勒河中下游的草本沼泽（T1）和季节性咸水沼泽（T2）土壤为研究对象，分析了这两种沼泽湿地土壤C、N、P生态化学计量学特征及其影响因素。结果表明：① 0～100 cm土壤C/N、N/P、C/P均为T2（15.07，5.94，98.01）＞T1（12.49，2.50，30.22）；随土层深度的增加，土壤C/N、N/P、C/P均在T1有两个峰值（0～10 cm和中间层），T2有一个峰值（中间层）。② 0～100 cm土壤C/N、N/P、C/P空间变异性大，且均为T2＞T1。③ T1和T2土壤的N/P与土壤水分呈极显著正相关（$P<0.01$），C/P与土壤水分、全N呈极显著正相关（$P<0.01$），与碱解N呈显著正相关（$P<0.05$）；T2土壤C/N、N/P、C/P与土壤容重呈极显著正相关（$P<0.01$），C/N与土壤水分呈极显著的正相关（$P<0.01$），N/P与土壤有机C呈显著正相关（$P<0.05$）；T1土壤N/P与土壤有机C呈极显著正相关（$P<0.01$）。④ 土壤水分是影响两种沼泽湿地土壤C、N、P计量比的关键因子。因此，保护干旱区湿地土壤关键在于采取合理的节水用水措施，该结果可为干旱区湿地土壤保护、管理以及生态恢复提供科学依据。

关键词： 草本沼泽；季节性咸水沼泽；土壤碳氮磷；生态化学计量学；疏勒河流域

生态化学计量学综合了生物、化学和物理的基本原理，研究生态系统能量和多重化学元素的平衡关系，为揭示生态系统的控制机制及元素间的耦合关系提供了一种重要方法[1-3]。碳（C）、氮（N）、磷（P）等生命元素在生态系统内循环迁移存在一定的内稳性，其相互耦合关系对维持生态系统结构、功能稳定性具有重要的意义[4]。其中，土壤C/N可用来预测土壤N的矿化能力，表征土壤有机质的分解程度及其对土壤肥力贡献的大小[5-6]；土壤N/P是预测土壤养分限制和土壤N饱和度的重要指标[1,7]；土壤C/P值可用来判断土壤P素矿化能力[8-9]。因此，研究土壤C、N、P生态化学计量学特征，对认识区域土壤内部的C、N、P元素的循环与平衡机制，揭示土壤养分有效性的调控机制及预测未来的变化等具有重要意义[10-11]。

湿地生态系统被称为“地球之肾”，在调节气候、保留营养物质、保护生物多样性等方面发挥着重大作用，其土壤是营养元素的主要截留者和储存库[12-13]。中国是世界上湿地资源最丰富的国家之一。Hu等[14]对洞庭湖3个优势植物群落土壤的研究表明，不同植物群落和土壤水分是影响土壤C、N、P及其计量比的关键因子。卜晓燕等[11]对宁夏平原河流、湖泊、沼泽3类湿地土壤研究发现，土壤C和N含量的空间差异性高于土壤P；肖烨等[15]比较分析了吉林省敦化市4种沼泽湿地，得出土壤含水量是影响土壤C/P和N/P的关键因子；胡敏杰等[12]研究了闽江河口短叶茳芏湿地，得出黏粒、砂粒、电导率、pH是影响河口湿地土壤C/N、C/P、N/P变化的关键因子。从研究区域来看，对湿地土壤生态化学计量学的研究主要集中在滨海河口湿地[10,12,16-19]、三江平原湿地[15,20]以及东部地区的湖泊湿地[14,21]，而对干旱区湿地，尤其是针对干旱区不同类型沼泽湿地的研究甚少。

河西走廊西段的沼泽湿地位于中国西北干旱区，其形成与高山－盆地组合的地貌特征有关，主要分布在各内陆河下游地带的低洼积水区域[22]，是自

① **收稿日期：** 2019－08－15； **修订日期：** 2019－11－11
基金项目： 国家自然科学基金项目（41461012）；甘肃省自然科学基金项目（1208RJAZ114）资助
作者简介： 赵海燕（1988－），女，硕士研究生，主要从事干旱区湿地生态方面的研究. E-mail：zhaohaiyan0129@126.com
通讯作者： 张剑. E-mail：jianzhang@nwnu.edu.cn

然形成的湿地荒漠复合生态系统，相比其他区域，对气候的变化更为敏感，更易受环境因素的影响。另外，土壤养分是湿地植物生长的主要限制因子[23]。因此，本文以河西走廊西段草本沼泽和季节性咸水沼泽湿地为研究对象，通过分析这两种沼泽湿地土壤C、N、P生态化学计量学特征及其影响因素，旨在揭示：① 两种沼泽湿地土壤C、N、P生态化学计量比特征及其土壤质量状况；② 两种沼泽湿地土壤C、N、P生态化学计量比与土壤理化性质之间的关系及其主导影响因素。本研究结果可为干旱区湿地的合理利用及湿地生态系统的保护和恢复提供理论依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区地理位置为92°20′~100°20′E，38°09′~42°48′N，位于甘肃省河西走廊西段，阿尔金山、马鬃山和祁连山之间，东临张掖市和内蒙古，西临新疆，南临青海省，北临内蒙古。年均降水量37~176 mm，年均蒸发量2 005~3 524 mm，年均气温为3.9~9.3 ℃，全年无霜期为127~158 d，属于温带大陆性干旱气候。研究区地势呈南高北低的趋势，由西南向东北倾斜，在地势低洼平坦处有多处大量且稳定的地下水溢出，为湿地提供了主要的水源供给。土壤主要由草甸土、沼泽土和盐土构成。主要植被类型为莎草型湿地植被型、禾草型湿地植被型，优势种为芦苇(*Phragmites australis*)，伴生种有水麦冬(*Triglochin palustre*)、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)、黑果枸杞(*Lycium ruthenicum*)、赖草(*Leymus secalinus*)、盐爪爪(*Kalidium foliatum*)等。

1.2 样地设置与采样

依据湿地分类标准[24]，选取研究区有代表性的两种沼泽湿地：草本沼泽湿地(T1)，由水生和沼生的草本植物组成优势群落的沼泽；季节性咸水沼泽湿地(T2)，受微咸水或咸水影响，只在部分季节维持浸湿或潮湿状态的沼泽。于2016年8月在研究区借助GPS进行坐标定位，采用样方法调查取样。选取7个湿地，依照各个湿地的走向，沿湿地边缘采取土样，每个湿地设置3~6个30 m×30 m样地，每个样地上随机布设3个1 m×1 m的样方，共计72(N=72)个样方。其中，T1包括渥洼池(N=18)、双塔水库(N=9)及北石河(N=9)湿地，共计36个样方，T2包括大苏干湖(N=9)、桥子乡(N=9)、塘墩湖－八棱墩湖(N=9)及双泉子(N=9)，共计36个样方，具体位置见图1。依据优势种芦苇根系的分布情况，在每个样方内，沿对角线，用土钻分层钻取0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm六层的土壤，去除杂质充分混合，装入编号的自封袋带回实验室。每个样方6个土样，本次共采集到432个土壤样品。

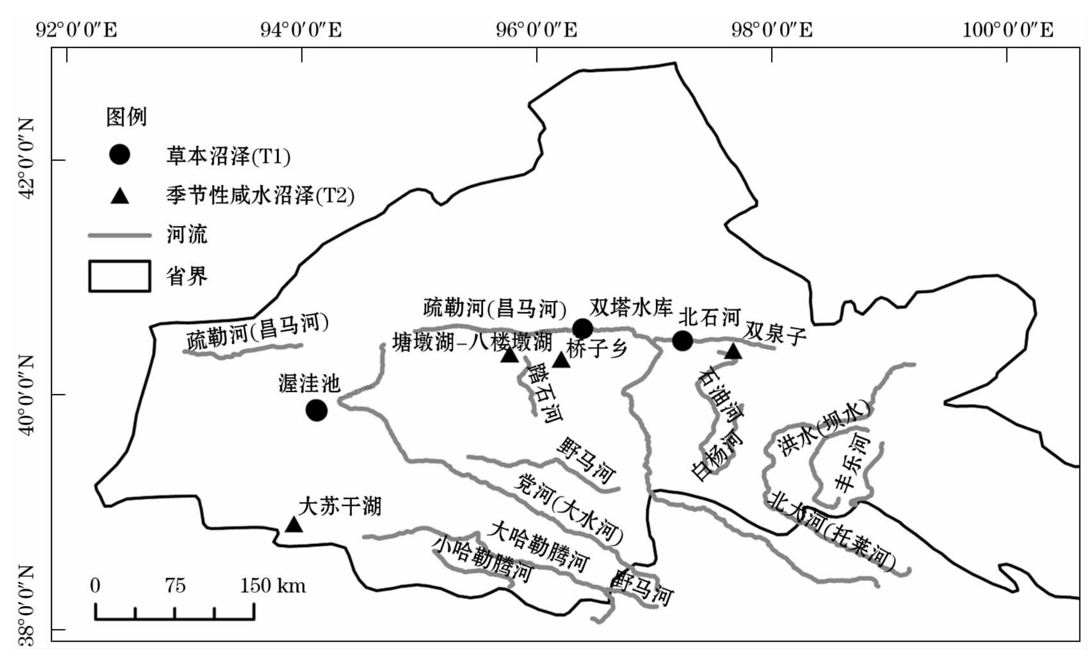


图1 研究区地理位置及采样点分布示意图

Fig. 1 Geographical location of the study area and distribution of the sampling sites

1.3 样品测定

采回的土样自然风干后研磨过筛,用常规法测定各层土壤理化性质并取平均值。采用烘干法测定土壤水分;环刀法测定土壤容重;酸度计测定土壤pH;重铬酸钾外加热法测定土壤有机C;凯氏定氮法测定土壤全N;钼锑抗比色法测定土壤全P;碱解扩散法测定土壤碱解N;碳酸氢钠法测定土壤有效P。研究区两种沼泽湿地的土壤理化性质见表1。

1.4 数据处理

利用Excel进行数据预处理,计算出两种沼泽湿地基于土壤有机C、全N和全P绝对数值的C/N、N/P、C/P。SPSS软件进行数据分析,采用单因素方差分析(ANOVA)法检验两种沼泽湿地土壤C/N、C/P、N/P及其变异系数之间与同一湿地类型不同土层C/N、N/P、C/P及其变异系数之间的差异;用Pearson相关分析法判定土壤理化性质与土壤C/N、N/P、C/P之间的相关性;用多元线性回归分析法分析影响土壤C/N、N/P、C/P的主要因子。利用OriginPro软件绘图。

2 结果与分析

2.1 两种沼泽湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量比特征

从图2可以看出,6层土壤均是季节性咸水沼泽(T2)>草本沼泽(T1),但差异性在不同土层略有不同,其中N/P、C/P的0~10 cm, C/N的0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm在两种沼泽湿地间差异不显著($P>0.05$),而其余的在两种沼泽湿地间均存在显著差异($P<0.05$);0~100 cm土壤C/N、N/P、C/P在T1分别为12.49、2.50、30.22,T2分别为15.07、5.94、98.01,均为T2显著高于T1($P<0.05$),分别高出0.21、1.38、2.24倍。

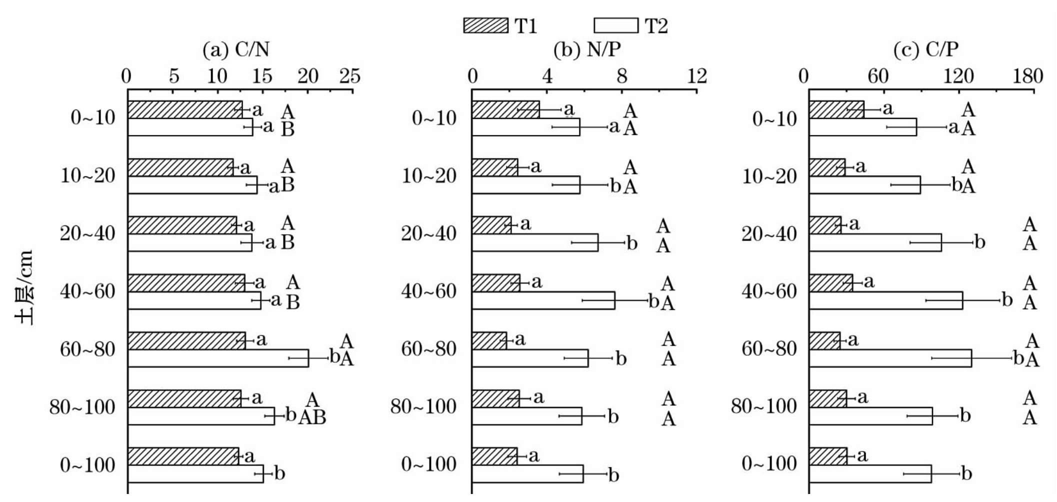
随土层深度的增加,T1土壤,C/N呈现减小-增大-减小的变化趋势,有两个峰值,在0~10 cm和60~80 cm(12.72和13.05);N/P和C/P呈现减小-增大-减小-增大的变化趋势,有两个峰值,在0~10 cm最大(3.60和43.88),40~60 cm为另一个次高峰;但土壤C/N、N/P、C/P在土层之间均不

表1 研究区土壤理化性质

Tab.1 Physical and chemical properties of soil in the study area

	水分(SM) /%	pH	容重(BD) /(g·cm^{-3})	有机碳(SOC) /(g·kg^{-1})	全氮(STN) /(g·kg^{-1})	全磷(STP) /(g·kg^{-1})	碱解氮(AN) /(mg·kg^{-1})	有效磷(AP) /(mg·kg^{-1})
草本沼泽(T1)	37.63±4.15b	8.37±0.17a	0.89±0.12a	9.30±1.88b	0.76±0.15b	0.35±0.04a	56.50±12.68b	7.36±1.13b
季节性咸水沼泽(T2)	66.27±11.71a	7.51±0.43a	0.52±0.04b	33.19±8.77a	1.94±0.47a	0.35±0.05a	142.51±33.51a	11.10±1.35a

注:数据为平均值±标准误差。同列不同小写字母表示存在显著差异($P<0.05$)。



注:数据为平均值±标准误差。小写字母表示两种沼泽湿地同层之间的差异性比较,不同则存在显著差异($P<0.05$)。大写字母表示同一沼泽湿地不同层之间差异性比较,不同则存在显著差异($P<0.05$)。T1 草本沼泽;T2 季节性咸水沼泽。下同。

图2 两种沼泽湿地土壤C/N、N/P、C/P的垂直分布特征

Fig.2 Vertical distribution characteristics of soil C/N, N/P and C/P in the two marsh wetlands

存在显著差异($P>0.05$)。T2 土壤,C/N、N/P、C/P 呈现先增大后减小的变化趋势,均有一个峰值,在中间层,其中 C/N 和 C/P 为 60～80 cm 最大(20.08 和 130.08),N/P 为 40～60 cm 最大(7.63);N/P、C/P 在土层之间不存在显著差异($P>0.05$)。

2.2 两种沼泽湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量比变异系数特征

整体来看,T1 和 T2 土壤 C、N、P 的生态化学计量比的变异系数较大,尤其是土壤 N/P 和 C/P 有较大的空间变异性。0～100 cm 土壤 C/N、N/P、C/P 的变异系数均为 T2 > T1。从垂直深度来看,T1 和 T2,土壤的 N/P、C/P 的变异系数在 0～10 cm 大于其他各层,而其他五层间无明显的变化规律。C/N 的变异系数随土层深度的增加无明显的变化规律。相对而言,T1 为 40～60 cm 最大,T2 为 60～80 cm 最大(表 2)。

表 2 两种沼泽湿地土壤 C/N、N/P、C/P 的变异系数特征

Tab. 2 Coefficient of Variation characteristics of soil C/N, N/P and C/P in the two marsh wetlands

土层/cm	C/N		N/P		C/P	
	T1	T2	T1	T2	T1	T2
0～10	23.34	24.40	111.86	88.89	104.54	96.24
10～20	17.39	28.72	83.76	88.81	81.34	92.11
20～40	15.99	31.04	55.88	72.74	61.50	81.85
40～60	27.54	23.47	65.07	79.20	76.75	83.04
60～80	24.95	37.60	62.00	71.20	68.58	85.27
80～100	23.45	22.75	82.45	71.53	80.72	71.46
0～100	15.25	20.52	69.83	70.26	72.73	74.55

2.3 两种沼泽湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量比的影响因素

2.3.1 碳、氮、磷生态化学计量比与土壤理化性质的相关分析 由土壤 C、N、P 生态化学计量比与土壤理化性质的 Pearson 相关分析可知(表 3),对 T1 而言,土壤 C/N 和所有土壤性质均无显著的相关性($P>0.05$);土壤 N/P 与土壤含水量和有机 C 呈极显著正相关($P<0.01$);土壤 C/P 与土壤含水量、全 N 呈极显著正相关($P<0.01$),与土壤碱解 N 呈显著正相关($P<0.05$)。对 T2 而言,土壤 C/N 与土壤含水量、容重呈极显著正相关($P<0.01$);土壤 N/P 与土壤含水量、容重呈极显著正相关($P<0.01$),与土壤有机 C 呈显著正相关($P<0.05$);土壤 C/P 与土壤含水量、容重、全 N 呈极显著正相关($P<0.01$),与土壤碱解 N 呈显著正相关($P<0.05$)。

2.3.2 碳、氮、磷生态化学计量比与土壤理化性质的多元线性回归分析 对两种沼泽湿地与土壤 C、N、P 生态化学计量比有显著相关的影响因子进行多元线性回归分析(表 4),可知,T1 土壤 N/P 和 C/P 均是土壤水分的偏回归系数最大,其主导影响因素

表 3 两种沼泽湿地土壤 C/N、N/P、C/P 与土壤理化性质的相关分析

Tab. 3 The relationship between soil C/N, N/P, C/P and soil physical and chemical properties in the two marsh wetlands

湿地类型	指标	SM	pH	BD	AN	AP	SOC	STN	STP
T1	C/N	-0.056	-0.429	-0.058	-	0.130	-	-	-0.471
	N/P	0.874**	-0.287	-0.294	-	-	0.825**	-	-
	C/P	0.821**	-0.338	-0.291	0.636*	-	-	0.766**	-
T2	C/N	0.821**	-0.536	0.801**	-	-0.277	-	-	0.269
	N/P	0.741**	-0.380	0.738**	-	-	0.642*	-	-
	C/P	0.815**	-0.420	0.820**	0.673*	-	-	0.738**	-

注:**表示 $P<0.01$,*表示 $P<0.05$。SM 表示土壤含水量,单位是%;BD 表示土壤容重,单位是 $g \cdot cm^{-3}$;SOC 表示土壤有机碳,单位是 $g \cdot kg^{-1}$;STN 表示土壤全氮,单位是 $g \cdot kg^{-1}$;STP 表示土壤全磷,单位是 $g \cdot kg^{-1}$;AN 表示碱解氮,单位是 $mg \cdot kg^{-1}$;AP 表示有效磷,单位是 $mg \cdot kg^{-1}$。-表示无数据。下同。

表 4 两种沼泽湿地土壤 C/N、N/P、C/P 与影响因素的多元线性回归分析

Tab. 4 Multiple regression of soil C/N, N/P, C/P and influencing factors in the two marsh wetlands

湿地类型	指标	回归方程	R^2	P
T1	N/P	$y=-1.136+8.078SM+0.056SOC$	0.722	0.001
	C/P	$y=-16.407+123.651SM-3.467STN+0.048AN$	0.676	0.023
T2	C/N	$y=7.909+4.509SM+7.965BD$	0.688	0.005
	N/P	$y=-4.181+6.584SM+13.154BD-0.034SOC$	0.579	0.063
	C/P	$y=-158.270-47.782SM+512.531BD+78.864STN-0.939AN$	0.751	0.028

是土壤水分;同理,T2 土壤 C/N、N/P 受土壤容重的影响较大,其次是土壤水分,土壤 C/P 主要受土壤容重影响,其次是土壤全 N 和土壤水分。考虑到 T2 土壤水分与土壤容重有极高的相关性(R^2 =0.843, P =0.00),其土壤容重特征与土壤水分密切相关,因此,土壤水分也是影响 T2 土壤 C/N、N/P、C/P 的主导因素。

3 讨 论

3.1 两种沼泽湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量比特征

土壤 C、N、P 生态化学计量比不但能作为土壤有机质组成和土壤质量状况以及养分供给能力的重要指标,也可作为土壤 C、N、P 矿化作用和固持作用的评价指标[16,25-26]。本研究中草本沼泽(T1)和季节性咸水沼泽(T2)土壤全 P 含量一致,均为 0.35 g·kg^{-1},而土壤有机 C 和全 N 含量 T2(33.19 g·kg^{-1},1.94 g·kg^{-1})显著高于 T1(9.3 g·kg^{-1},0.76 g·kg^{-1}),最终导致 0~100 cm 土壤的 N/P、C/P 均为 T2(5.94,98.01)显著高于 T1(2.50,30.22)。土壤 P 含量主要来源于岩石的风化,与母质有关,是一个漫长且相对稳定的过程,不易受生物与非生物条件的影响[27],两种沼泽湿地土壤全 P 无显著差异,说明二者的成土母质差异不大。土壤 C、N 元素主要来源于凋落物的归还和土壤微生物的分解作用[18],已有研究表明,草本沼泽土壤的持水性能和蓄水性能较差[28],土壤水肥状况较差,而季节性咸水沼泽在近湖边,季节性的湖水淹没,使其土壤含水量较高(表 1),必然导致生物量增大,植物枯枝落叶及腐根丰富,土壤 C、N 含量偏高,因此,土壤 N/P、C/P 在季节性咸水沼泽(T2)较高。此外,土壤 C/N 是土壤 N 素矿化能力的重要标志,表征土壤中有机质的分解速率[5-6],本研究中土壤 0~100 cm 的 C/N 在 T2(15.07)显著大于 T1(12.49),说明 T2 土壤 N 素矿化能力较低,微生物可能受到 N 素的限值,有机质的分解速率较低,导致土壤中 C 储量增加[29]。

本研究中土壤 C/N、N/P、C/P 在两种沼泽湿地均低于全国湿地土壤平均水平(18.22,13.60,245.22)[29],而 T1 和 T2 的 C/N 以及 T2 的 N/P、C/P高于全国土壤平均水平(11.94,5.2,61)[30]。可能是因为研究区干旱少雨的气候条件和高盐碱化的土壤环境,抑制了土壤微生物的活性,减少了土壤有机物的矿化分解,造成土壤有机 C 远低于我国部分湿地,如吉林东部沼泽湿地(313.50~368.78 g·kg^{-1})[15],若尔盖沼泽湿地(82.69~241.66 g·kg^{-1})[31],尕海沼泽湿地(78.29~143.77 g·kg^{-1})[32],使得土壤 C/N、N/P、C/P 低于全国湿地平均水平。然而,湿地生态系统是陆地生态系统中单位面积 C 储量最高的生态系统,具有富 C 的特点[29,33],使得两种湿地的 C/N 以及 T2 的 N/P、C/P 高于全国土壤。

随土层深度的增加,T1 土壤的 C/N、N/P、C/P 均出现两个峰值,分别在表层(0~10 cm)和中间层。土壤表层丰富的凋落物是土壤有机质的重要来源,在土壤 P 一定的条件下,必然导致表层较高的 N/P 和 C/P,这与彭佩钦等[21]对洞庭湖湿地以及韩华等[18]对崇明滩涂湿地的研究结果一致;其 C/N、N/P、C/P 在中间层也有一个峰值,因为 40~60 cm 为优势种芦苇根系集中分布区[34],芦苇根系分泌物和微生物活动量增加,以及大量死根腐解增加,使土壤有机质增加所造成[35]。T2 土壤 C/N、N/P、C/P 先增大后减小,在中间层有一个峰值,这也是芦苇根系集中所致,而没有出现表层峰值,可能是营养元素向深层的机械迁移[36]造成的。另外,两种沼泽湿地土壤计量比在不同土层之间差异不大,说明土层间土壤 N 素矿化能力、有机质的分解速率、P 元素矿化能力等变化较小[5-6,8-9]。

0~100 cm 土壤 C/N、N/P、C/P 有较大的空间变异性,可能是受区域水热条件、成土作用以及气候、地形、母岩、植被、土壤动物等因子和人类活动的影响,造成土壤 C、N、P 元素的含量及分布具有明显的异质性[20,29];土壤 C/N、N/P、C/P 的变异程度均为 T2>T1,可能是因为季节性咸水沼泽湿地受季节性水文波动,由土壤元素的变动性较大引起的;T2 和 T1 的 N/P、C/P 变异系数均为表层最大,说明表层土壤更容易受外界影响,尤其是对土壤有机质的影响,造成土壤有机 C 和全 N 的异质性。

3.2 两种沼泽湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量比的影响因素

已有研究表明,土壤水分在土壤化学计量学中起着重要的作用,会引起土壤中有机 C、全 N、全 P 及其计量比的变化[14,37]。本研究中土壤水分与两种湿地土壤的 N/P、C/P 呈极显著正相关,是因为在土壤含水量较高时,有机质的厌氧分解受到抑制,导

致有机 C 的积累[14],同时限制了土壤微生物的活动,不利于有机 N 的矿化和分解[38-39],导致相对较高的 N 浓度,进而使得 N/P、C/P 升高。而土壤水分与 C/N 的关系在 T2 表现为极显著正相关,T1 相关性不显著,说明土壤水分对土壤有机 C、全 N 的影响在 T2 具有很高的一致性,而在 T1 更为复杂。有研究表明,较高的土壤水分能减缓泥炭、残体及凋落物的氧化分解,提高 C、N 在生态系统中的循环效率,有效防止湿地退化[40],说明季节性咸水沼泽湿地更不容易退化。此外,由多元线性回归分析可知,T1 土壤 N/P、C/P 的主导影响因子是土壤水分,说明在干旱区土壤水分较少的沼泽湿地,其土壤 C、N、P 生态化学计量比更易受土壤水分的影响。

pH 是衡量土壤酸碱性的重要指标,直接影响土壤微生物活性,进而影响土壤中 C、N、P 的固定、累积能力及其存在的形态和转化方式[19,33]。以往研究表明,湿地土壤中的 C/N、N/P、C/P 与土壤 pH 呈显著的负相关关系[29],而在本研究中,两种湿地土壤的 pH 与土壤 C/N、N/P、C/P 不存在显著的相关性,可能是因为两种沼泽湿地土壤呈碱性且差异性不大,pH 的波动对微生物活动影响一致[34]。

土壤容重是反映土壤性状的重要指标,它与土壤的水、热状况密切相关,其大小能反映出土壤结构状况和有机质含量的高低[28,41]。本研究中 T2 土壤容重显著低于 T1,是因为 T2 土壤水分较高,生物量较大,土壤中的枯枝落叶及腐根更多,有机质含量更高,腐殖质多,土壤较疏松,相应的孔隙度就大,土壤容重就小[42]。有研究表明,土壤有机质可以解释土壤容重 81% 的变异[43]。可见,虽表 4 得出 T2 土壤 C/N、N/P 和 C/P 受土壤容重影响较大,但也可进一步归结为因土壤水分较高所导致。本研究中土壤容重与 T1 土壤 C/N、N/P、C/P 均没有显著相关性,说明当土壤容重大到一定的程度时,土壤紧实状况一致,有机质含量一致,反而不会对土壤生态化学计量比产生显著的影响,而与 T2 土壤的 C/N、N/P、C/P 呈显著的正相关关系。这与张珊[44]的研究结果一致,而与李红林等[45]研究得出土壤容重与土壤 N/P、C/P 呈极显著负相关关系的结论相悖,这可能与研究区土壤类型等因素有关。土壤容重也是衡量湿地土壤持水性能、蓄水性能以及熟化程度的重要指标之一[17,46],T2 容重较小,说明季节性咸水沼泽比草本沼泽的持水性能、蓄水性能更好,土壤熟化程度更高。

湿地土壤 C、N、P 含量直接影响着湿地的初级生产力,三者之间有密切的耦合关系[47]。速效 N、P 能直接被作物吸收利用,可用来衡量土壤的肥沃程度,土壤全 N 和全 P 是其重要来源之一[44,48]。一般情况下,随着土壤有机 C 含量的增加,土壤中营养元素 N、P 的有效性也随之增加[49]。本研究中两种沼泽湿地土壤的 N/P 与有机 C 呈显著的正相关关系,C/P 与碱解 N 及全 N 呈显著的正相关关系,很好地证明了土壤有机 C、全 N 以及碱解 N 之间的耦合关系。而 C/N 与土壤全 P 及有效 P 之间不存在显著的相关关系,说明研究区土壤 P 的变化相对稳定。

4 结 论

研究区两种沼泽湿地土壤生态化学计量比存在明显的差异,季节性咸水沼泽土壤 C/N、N/P、C/P 均大于草本沼泽,其土壤生产力状况较好;水分为研究区两种沼泽湿地土壤 C/N、N/P、C/P 主要的影响因子。说明,可基于不同湿地类型,采取有差别的措施进行干旱区湿地土壤恢复与保护,同时表明,保护干旱区湿地土壤关键在于采取合理的节水用水措施,以保障湿地生态用水。

参考文献(References):

[1] 王绍强,于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报,2008,28(8):3937-3947. [Wang Shaoqiang, Yu Guirui. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphoeus elements[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008,28(8):3937-3947.]

[2] 贺金生,韩兴国. 生态化学计量学:探索从个体到生态系统的统一化理论[J]. 植物生态学报,2010,34(1):2-6. [He Jinsheng, Han Xingguo. Ecological stoichiometry: Searching for unifying principles from individuals to ecosystems[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010,34(1):2-6.]

[3] 王凯,吴祥云,卢慧,等. 阜新市主要园林树种叶片生态化学计量特征[J]. 干旱区研究, 2013,30(2):236-241. [Wang Kai, Wu Xiangyun, Lu Hui, et al. Leaf stoichiometric properties of garden tree species in Fuxin City[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(2):236-241.]

[4] Lal. Soil carbon sequestration impacts on global climate chang and food security[J]. Science, 2004, 304(5677):1623-1627.

[5] 张春华,王宗明,居为民,等. 松嫩平原玉米带土壤碳氮比的时空变异特征[J]. 环境科学,2011,32(5):1407-1414. [Zhang Chunhua, Wang Zongming, Ju Weimin, et al. Spatial and temporal variability of soil C/N ratio in Songnen Plain maize belt[J]. Envi-

ronmental Science,2011,32(5):1407－1414.]

[6] 陶冶,张元明,周晓兵. 伊犁野果林浅层土壤养分生态化学计量特征及其影响因素[J]. 应用生态学报,2016,27(7):2239－2248. [Tao Ye,Zhang Yuanming,Zhou Xiaobing. Ecological stoichiometry of surface soil nutrient and its influencing factors in the wild fruit forest in Yili region,Xinjiang,China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2016,27(7):2239－2248.]

[7] Zhao F Z,Kang D,Han X H,et al. Soil stoichiometry and carbon storage in long-term afforestation soil affected by understory vegetation diversity[J]. Ecological Engineering,2015,74:415－422.

[8] 王建林,钟志明,王忠红,等. 青藏高原高寒草原生态系统土壤碳磷比的分布特征[J]. 草业学报,2014,23(2):9－19. [Wang Jianlin,Zhong Zhiming,Wang Zhonghong,et al. Soil C/P distribution characteristics of alpine steppe ecosystems in the Qinhai-Tibetan Plateau[J]. Acta Prataculturae Sinica,2014,23(2):9－19.]

[9] 曾全超,李鑫,董扬红,等. 黄土高原延河流域不同植被类型下土壤生态化学计量学特征[J]. 自然资源学报,2016,31(11):1881－1891. [Zeng Quanchao,Li Xin,Dong Yanghong,et al. Ecological stoichiometry of soils in the Yanhe watershed in the Loess Plateau:The influence of different vegetation zones[J]. Journal of Natural Resources,2016,31(11):1881－1891.]

[10] 王维奇,王纯,曾从盛,等. 闽江河口不同河段芦苇湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 生态学报,2012,32(13):4087－4093. [Wang Weiqi,Wang Chun,Zeng Congsheng,et al. Soil carbon,nitrogen and phosphorus ecological stoichiometry of *Phragmites australis* wetlands in different reaches in Minjiang River estuary[J]. Acta Ecologica Sinica,2012,32(13):4087－4093.]

[11] 卜晓燕,米文宝,许浩,等. 宁夏平原不同类型湿地土壤碳氮磷含量及其生态化学计量学特征[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2016,42(1):107－118. [Bu Xiaoyan,Mi Wenbao,Xu Hao,et al. Contents and ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in wetlands of Ningxia plain[J]. Journal of Zhejiang University(Agriculture & Life Sciences Edition),2016,42(1):107－118.]

[12] 胡敏杰,邹芳芳,邹双全,等. 盐度梯度下闽江口短叶茳芏湿地土壤生态化学计量学特征[J]. 城市环境与城市生态,2014,27(4):17－21. [Hu Minjie,Zou Fangfang,Zou Shuangquan,et al. Ecological stoichiometry characteristics of the *Cyperus malaccensis* wetland soils in Min River estuary along with a salinity gradient [J]. Urban Environment & Urban Ecology,2014,27(4):17－21.]

[13] 缑倩倩,屈建军,王国华,等. 中国干旱半干旱地区湿地研究进展[J]. 干旱区研究,2015,32(2):213－220. [Gou Qianqian,Qu Jianjun,Wang Guohua,et al. Progress of wetland researches in arid and semi-arid regions in China[J]. Arid Zone Research,2015,32(2):213－220.]

[14] Hu C,Li F,Xie Y H,et al. Soil carbon,nitrogen,and phosphorus stoichiometry of three dominant plant communities distributed along a small-scale elevation gradient in the East Dongting Lake[J]. Physics and Chemistry of the Earth,Parts A/B/C,2018,103(1):28－34.

[15] 肖烨,商丽娜,黄志刚,等. 吉林东部山地沼泽湿地土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量学特征[J]. 地理科学,2014,34(8):994－1001. [Xiao Ye,Shang Lina,Huang Zhigang,et al. Ecological stoichiometry characteristics of soil carbon,nitrogen and phosphorus in mountain swamps of eastern Jilin Province[J]. Scientia Geographica Sinica,2014,34(8):994－1001.]

[16] 刘兴华. 黄河三角洲湿地植物与土壤 C、N、P 生态化学计量特征研究[D]. 泰安:山东农业大学,2013. [Liu Xinghua. C,N,P Stoichiometry of Plants and Soil in the Wetland of Yellow River Delta[D]. Tai'an:Shandong Agricultural University,2013.]

[17] 刘文龙,谢文霞,赵全升,等. 胶州湾芦苇潮滩土壤碳、氮和磷分布及生态化学计量学特征[J]. 湿地科学,2014,12(3):362－368. [Liu Wenlong,Xie Wenxia,Zhao Quansheng,et al. Spatial distribution and ecological stoichiometry characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in soil in *Phragmites australis* tidal flat of Jiaozhou Bay[J]. Wetland Science,2014,12(3):362－368.]

[18] 韩华,王昊彬,余华光,等. 崇明滩涂湿地不同盐度梯度下芦苇种群及土壤的生态化学计量学特征[J]. 长江流域资源与环境,2015,24(5):816－823. [Han Hua,Wang Haobin,Yu Huaguang,et al. Ecological stoichiometry of carbon,nitrogen and phosphorus of *Phragmites australis* population under soil salinity gradients in Chongming wetlands[J]. Resources and Environment in The Yangtze Basin,2015,24(5):816－823.]

[19] 张友,徐刚,高丽,等. 黄河三角洲新生湿地土壤碳氮磷分布及其生态化学计量学意义[J]. 地球与环境,2016,44(6):647－653. [Zhang You,Xu Gang,Gao Li,et al. Distribution characteristics of soil C,N and P in newly-formed wetlands of the Yellow River Delta,China and their stoichiometry implications[J]. Earth and Environment,2016,44(6):647－653.]

[20] Zhang Z S,Lu X G,Song X L,et al. Soil C,N and P stoichiometry of *Deyeuxia angustifolia* and *Carex lasiocarpa* wetlands in Sanjiang Plain,Northeast China[J]. Journal of soils and sediments,2012,12(9):1309－1315.

[21] 彭佩钦,张文菊,童成立,等. 洞庭湖湿地土壤碳、氮、磷及其与土壤物理性状的关系[J]. 应用生态学报,2005,16(10):1872－1878. [Peng Peiqin,Zhang Wenju,Tong Chengli,et al. Soil C,N and P contents and their relationships with soil physical properties in wetlands of Dongting Lake flood plain[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2005,16(10):1872－1878.]

[22] 王效科,欧阳志云,苗鸿,等. 中国西北干旱地区湿地生态系统的形成,演变和保护对策[J]. 国土与自然资源研究,2003,1(4):52－54. [Wang Xiaoke,Ouyang Zhiyun,Miao Hong,et al. Formation,evolution and protection of wetland ecosystems in arid region,Northwestern China[J]. Territory & Natural Resources Study,2003,1(4): 52－54.]

[23] 王勇辉,焦黎. 艾比湖湿地土壤有机碳及储量空间分布特征[J]. 生态学报,2016,36(18):5893－5901. [Wang Yonghui,Jiao Li. The characteristics and storage of soil organic carbon in the Ebinur Lake wetland[J]. Acta Ecologica Sinica,2016,36(18):

5893 – 5901.]

[24] 国家林业局. GB/T 24708 – 2009 湿地分类[S]. 北京:中国标准出版社,2010. [State Forestry Administration. GB/T 24708 – 2009 Wetland Classification[S]. Beijing:China Standards Press, 2010.]

[25] 张婷,翁月,姚凤娇,等. 放牧强度对草甸植物小叶章及土壤化学计量比的影响[J]. 草业学报,2014,23(2):20 – 28. [Zhang Ting,Weng Yue,Yao Fengjiao,et al. Effect of grazing intensity on ecological stoichiometry of *Deyeuxia angustifolia* and meadow soil [J]. Acta Prataculturae Sinica,2014,23(2):20 – 28.]

[26] 高丽倩,赵允格,许明祥,等. 生物土壤结皮演替对土壤生态化学计量特征的影响[J]. 生态学报,2018,38(2):678 – 688. [Gao Liqian,Zhao Yunge,Xu Mingxiang,et al. The effects of biological soil crust succession on soil ecological stoichiometry characteristics[J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(2):678 – 688.]

[27] Craine J M,Jackson R D. Plant nitrogen and phosphorus limitation in 98 North American grassland soils[J]. Plant and Soil,2010,334 (1 – 2):73 – 84.

[28] 张剑,王利平,谢建平,等. 敦煌阳关湿地土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. 生态学杂志,2017,36(9):2455 – 2464. [Zhang Jian,Wang Liping,Xie Jianping,et al. Distribution and influencing factors of soil organic carbon in Dunhuang Yangguan wetland[J]. Chinese Journal of Ecology,2017,36(9):2455 – 2464.]

[29] 张仲胜,吕宪国,薛振山,等. 中国湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征研究[J]. 土壤学报,2016,53(5):1160 – 1169. [Zhang Zhongsheng,Lyu Xianguo,Xue Zhengshan,et al. Is there a redfield-type C:N:P ratio in Chinese wetland soils? [J]. Acta Pedologica Sinica,2016,53(5):1160 – 1169.]

[30] Tian H Q,Chen G S,Zhang C,et al. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils:A synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry,2010,98(1 – 3):139 – 151.

[31] 周文昌,崔丽娟,王义飞,等. 若尔盖高原泥炭地生态系统碳储量[J]. 生态学杂志,2016,35(8):1981 – 1987. [Zhou Wenchang,Cui Lijuan,Wang Yifei,et al. Carbon storage of the peatland ecosystems in Zoige Plateau,China[J]. Chinese Journal of Ecology,2016,35(8):1981 – 1987.]

[32] 马维伟,王辉,黄蓉,等. 尕海湿地生态系统土壤有机碳储量和碳密度分布[J]. 应用生态学报,2014,25(3):738 – 744. [Ma Weiwei,Wang Hui,Huang Rong,et al. Distribution of soil organic carbon storage and carbon density in Gahai wetland ecosystem[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2014,25(3):738 – 744.]

[33] 邵学新,杨文英,吴明,等. 杭州湾滨海湿地土壤有机碳含量及其分布格局[J]. 应用生态学报,2011,22(3):658 – 664. [Shao Xuexin,Yang Wenying,Wu Ming,et al. Soil organic carbon content and its distribution pattern in Hangzhou Bay coastal wetlands[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2011,22(3):658 – 664.]

[34] 张剑,宿力,王利平,等. 植被盖度对土壤碳、氮、磷生态化学计量比的影响——以敦煌阳关湿地为例[J]. 生态学报,2019,39 (2):580 – 589. [Zhang Jian,Su Li,Wang Liping,et al. The effect of vegetation cover on ecological stoichiometric ratios of soil carbon, nitrogen and phosphorus: A case study of the Dunhuang Yangguan wetland[J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(2):580 – 589.]

[35] 李玮,郑子成,李廷轩. 不同植茶年限土壤团聚体碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 应用生态学报,2015,26(1):9 – 16. [Li Wei,Zheng Zicheng,Li Tingxuan. Ecological stoichiometry of soil carbon,nitrogen and phosphorus within soil aggregates in tea plantations with different ages[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015,26(1):9 – 16.]

[36] Jobbagy E G,Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. Ecological applications,2000,10(2):423 – 436.

[37] Wang J J,Bai J H,Zhao Q Q,et al. Five-year changes in soil organic carbon and total nitrogen in coastal wetlands affected by flow-sediment regulation in a Chinese delta[J]. Scientific Reports, 2016,6:1 – 8.

[38] Bai J H,Deng W,Zhu Y M,et al. Spatial variability of nitrogen in soils from land/inland water ecotones[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis,2004,35(5 – 6):735 – 749.

[39] Zhao Q Q,Bai J H,Liu Q,et al. Spatial and seasonal variations of soil carbon and nitrogen content and stock in a tidal salt marsh with *Tamarix chinensis*,China[J]. Wetlands,2016,36(1):145 – 152.

[40] 王元峰,王辉,马维伟,等. 尕海 4 种湿地类型土壤水分特性研究[J]. 干旱区研究,2012,29(4):598 – 603. [Wang Yuanfeng, Wang Hui,Ma Weiwei,et al. Soil moisture properties in four types of wetland in Gahai[J]. Arid Zone Research,2012,29(4):598 – 603.]

[41] 崔楠,吕光辉,刘晓星,等. 胡杨、梭梭群落土壤理化性质及其相互关系[J]. 干旱区研究,2015,32(3):476 – 482. [Cui Nan, Lyu Guanghui,Liu Xiaoxing,et al. Soil physical-chemical properties of *Populus euphratica* and *Haloxylon persicum* communities and their relationship[J]. Arid Zone Research,2015,32(3):476 – 482.]

[42] 魏强,凌雷,王多锋,等. 不同海拔甘肃兴隆山主要森林群落的土壤理化性质[J]. 西北林学院学报,2019,34(4):26 – 35. [Wei Qiang,Ling Lei,Wang Duofeng,et al. Soil physicochemical properties of three main forest communities at different altitudes in Xinglong Mountain of Gansu province[J]. Journal of Northwest Forestry University,2019,34(4):26 – 35.]

[43] Yang Y H,Mohammat A,Feng J M,et al. Storage,patterns and environmental controls of soil organic carbon in China[J]. Biogeochemistry,2007,84(2):131 – 141.

[44] 张珊. 不同林龄序列云杉人工林土壤化学计量特征及其与土壤因子的相关性研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2017. [Zhang Shan. Study on the Relationship between Soil Ecological Stoichiometry of Spruce Plantation in Different Forest Age and Soil Factor [D]. Lanzhou:Gansu Agricultural University,2017.]

[45] 李红林,贡璐,朱美玲,等. 塔里木盆地北缘绿洲土壤化学计量特征[J]. 土壤学报,2015,52(6):1345 – 1355. [Li Honglin,

Gong Lu,Zhu Meiling,et al. Stoichiometric characteristics of soil in an oasis on northern edge of Tarim Basin,China[J]. Acta Pedologica Sinica,2015,52(6):1345－1355.]

[46] 石福臣,李瑞利,王绍强,等. 三江平原典型湿地土壤剖面有机碳及全氮分布与积累特征[J]. 应用生态学报,2007,18(7):1425－1431. [Shi Fuchen,Li Ruili,Wang Shaoqiang,et al. Profile distribution and accumulation characteristics of organic carbon and total nitrogen in typical marshes in Sanjiang Plain[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2007,18(7):1425－1431.]

[47] 罗先香,敦萌,闫琴. 黄河口湿地土壤磷素动态分布特征及影响因素[J]. 水土保持学报,2011,25(5):154－160. [Luo Xianxiang,Dun Meng,Yan Qing. Dynamic distribution and influence factors of soil phosphorus in Yellow River estuary wetland[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2011,25(5):154－160.]

[48] 宋双双,孙保平,张建锋,等. 保水剂与微生物菌剂对土壤水分、养分的影响[J]. 干旱区研究,2018,35(4):761－769. [Song Shuangshuang,Sun Baoping,Zhang Jianfeng,et al. Effects of water-retaining agent and microbial agent on soil moisture and nutrient content[J]. Arid Zone Research,2018,35(4):761－769.]

[49] 董洪芳,于君宝,孙志高,等. 黄河口滨岸潮滩湿地植物－土壤系统有机碳空间分布特征[J]. 环境科学,2010,31(6):1594－1599. [Dong Hongfang,Yu Junbao,Sun Zhigao,et al. Spatial distribution characteristics of organic carbon in the soil-plant systems in the Yellow River estuary tidal flat wetland[J]. Environmental Science,2010,31(6):1594－1599.]

Characteristics and determining factors for ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in different marsh wetlands

ZHAO Hai-yan, ZHANG Jian, LIU Dong, QI Xuan-xuan, XIE Huan-jie

(*College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou* 730070, *Gansu, China*)

Abstract: Wetlands play an important role in improving the regional ecological environment and maintaining regional ecological stability in arid regions. Studying the ecological stoichiometric traits of wetland soils is therefore conducive to understanding soil nutrient supply capacity and the recycling and balance mechanisms of soil carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) in arid wetlands. This study collected soil samples from herbaceous marsh (T1) and seasonal saline marsh (T2) located in the west section of Gansu Corridor, from the middle and lower reaches of the Shule River, and analyzed their traits in order to determine the key factors affecting the ecological stoichiometry of soil C, N, and P. The results showed that: (1) At 0－100 cm soil depths, the C/N, N/P, C/P ratios of T2 soils (15.07, 5.94, 98.01) were greater than those of T1 soils (12.49, 2.50, 30.22). With increasing soil depth, C/N, N/P, C/P exhibited two peaks in T1 (0－10 cm and interlayers) and one peak in T2 (interlayer) soils. (2) At 0－100 cm soil depths, C/N, N/P, C/P showed large spatial variability with the coefficient of variance (CV) being greater in T2 than in T1. (3) At both T1 and T2, soil N/P was significantly positively correlated with soil moisture ($P<0.01$), C/P was significantly positively correlated with both soil moisture and soil total nitrogen ($P<0.01$), and also with alkali-hydrolyzable nitrogen ($P<0.05$). At T2, soil C/N, N/P, C/P were significantly positively correlated with soil bulk density ($P<0.01$), C/N was significantly positively correlated with soil moisture ($P<0.01$), and N/P was significantly positively correlated with soil organic carbon ($P<0.05$). At T1, soil N/P was also significantly positively correlated with soil organic carbon ($P<0.01$). (4) Soil moisture was found to be the key factor affecting the ecological stoichiometric ratios of soil C, N, and P in both marsh wetlands. As a result, the key to wetland protection in arid areas is to adopt reasonable measures for saving water. These results provide a scientific basis for soil protection, management, and the ecological restoration of wetlands in arid regions.

Key words: herbaceous marsh; seasonal saline marsh; soil carbon; nitrogen and phosphorus; ecological stoichiometry; Shule River Basin